

Kai Nagel

# Analyse der Wirkungen von Straßenbenützungsgebühren mittels agentenbasierter Modellierung

**Conference object, Published version**

This version is available at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:83-opus4-73439>.



## **Suggested Citation**

Nagel, Kai: Analyse der Wirkungen von Straßenbenützungsgebühren mittels agentenbasierter Modellierung. - Pkw-Straßenbenützungsgebühren - Lösung oder Hemmschuh für eine nachhaltige Mobilität? : Tagungsband zur Fachtagung am Mo., 29.09.2014 anlässlich des 70. Geburtstags von Gerd Sammer. - Wien : Inst. für Verkehrswesen, 2015. - (Schriftenreihe / Institut für Verkehrswesen, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Universität für Bodenkultur Wien ; 35). - S. 47-60.

## **Terms of Use**

German Copyright applies. A non-exclusive, non-transferable and limited right to use is granted. This document is intended solely for personal, non-commercial use.

WISSEN IM ZENTRUM  
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK

Technische  
Universität  
Berlin

## Prof. Dr. Kai NAGEL

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

[nagel@vsp.tu-berlin.de](mailto:nagel@vsp.tu-berlin.de)



### ***Analyse der Wirkungen von Straßenbenutzungsgebühren mittels agentenbasierter Modellierung***

#### **1. Einleitung**

Die Weiterentwicklung von Hardware und Programmierwerkzeugen hat es möglich gemacht, große Verkehrssysteme mit mehreren Millionen von Reisenden synthetisch nachzubauen und zu simulieren. In solchen Simulationen werden alle synthetischen Reisenden mit einem individuellen Tagesplan ausgestattet, welcher eine Abfolge von Aktivitäten und Orten enthält, die durch Wege verbunden sind.

Wie es üblich ist, wird diese Simulation zunächst für den Bezugsfall ins Gleichgewicht gebracht, indem die synthetischen Reisenden Routen, Verkehrsmittel, Abfahrtszeiten etc. so lange verändern, bis sie sich nicht mehr verbessern können. Die betrachteten Anpassungsdimensionen sind dabei konfigurierbar.

Anschließend wird die Maßnahme, hier eine Maut, eingerichtet. Die synthetischen Reisenden reagieren darauf entsprechend ihrer Anpassungsdimensionen und erreichen ein neues Gleichgewicht. Wie üblich können Bezugsfall und Planfall miteinander vergleichen und bewertet werden.

Es werden Resultate für folgende Fälle gezeigt und diskutiert:

- Der sogenannte e-toll in Gauteng (Südafrika).
- Eine hypothetische Internalisierung externer Kosten für den Großraum München.
- Eine hypothetische Cordon-Maut am Autobahn-Ring in Brüssel.

Der mikroskopische Ansatz erlaubt dabei die nachträgliche Aggregation der Resultate in beliebige Untergruppen der Gesamtbevölkerung. Dies erlaubt die Identifikation von Projektgewinnern und -verlierern und damit von potentiellen Befürwortern und Gegnern. Von der Tendenz her erscheinen Mautsysteme, welche auch steuernde Wirkung haben, effizienter als solche, welche nur der Einnahmengenerierung dienen.



## 2. E-toll in Gauteng (Südafrika)

### 2.1 Situation

Die Provinz Gauteng in Südafrika umfasst den Großraum Johannesburg-Pretoria. Sie hat 12 Millionen Einwohner und erwirtschaftet 10% der Wirtschaftsleistung des gesamten afrikanischen Kontinents.

In Konsequenz dieser hohen wirtschaftlichen Aktivität ist das Verkehrssystem zunehmend stark belastet. Zum Ausgleich wurden vor allem zwei Maßnahmen durchgeführt:

- Massiver Autobahnausbau, bei dem die Kapazität um ca. 50% erhöht wurde (z.B. Standish et al., 2010).
- Einführung des Gautrain zwischen Pretoria und Johannesburg, eine Regionalsbahnlinie mit deutlich höherem Sicherheitsstandard als die bestehenden Pendlerzüge.

Dieser Text konzentriert sich auf ersteres.

Der Ausbau der Autobahnen wurde zunächst durch Kredite finanziert. Diese Kredite sollen u.a. durch den sogenannten e-Toll bedient werden. Straßenbenutzungsgebühren sind in Südafrika kein unbekanntes Konzept: Auf vielen Überland-Strecken sind sie seit langem üblich. Neu beim e-Toll ist, dass er auch auf typischen Pendler-Strecken erhoben werden soll. Um dem hohen Verkehrsaufkommen gerecht zu werden, wurde eine elektronische Erhebungsmethode gewählt, beruhend auf RFID-Tags im Fahrzeug und entsprechender Infrastruktur straßenseitig.

Die Finanzierung über eine Gebühr wurde gewählt, weil z.B. eine Erhöhung der Treibstoff-Steuer nicht zweckgebunden erfolgen kann. Damit stünden auch nach einer Erhöhung der Treibstoff-Steuer die Ausgaben für die Verkehrsinfrastruktur im Wettstreit mit Ausgaben z.B. für sozialen Wohnungsbau oder für eine bessere gesundheitliche Versorgung der Bevölkerung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein großer Teil der Bevölkerung sehr arm ist und daher ein erheblicher Nachholbedarf besteht. Die Finanzierung von Infrastruktur-Maßnahmen, so wichtig sie für das wirtschaftliche Funktionieren des Landes sind, hat hier immer eine Tendenz, nachrangig zu sein.

Die Höhe der Maut betrug bei ihrer Einführung 2013 ZAR 0,7, 2,1, und 4,2 pro km für Fahrzeuge bis 6 Meter (= Pkw), zwischen 6 und 12,5 Meter (kleine Lkw) und über 12,5 Meter (große Lkw). Darüber hinaus existiert ein differenziertes Rabattsystem z.B. für die Verwendung von eTags (ansonsten erfolgt die Erfassung über die Nummernschilder), für Fahrten während der Nebenverkehrszeiten oder für Minibus-Taxis. 10 ZAR (Südamerikanische Rand) entsprachen 2013 knapp einem Euro.



## 2.2 Agenten-basierte Simulation des e-Toll

Die agenten-basierte Simulation des Mautsystems beruht auf der Software MATSim (Multi-Agent Traffic Simulation; siehe Balmer et al., 2009). Das Szenario wurde von Johan Joubert und seiner Arbeitsgruppe bereitgestellt (du Plessis und Joubert, 2012; Venter und Joubert, 2013, 2014; Nagel et al., 2014).

### Anfangs- und Randbedingungen

Das digitale **Straßennetz** wurde durch Aufbereitung aus OpenStreetMap<sup>1</sup> erhalten.

Die synthetische **Nachfrage** entstand aus folgenden Bausteinen:

- Eine synthetische Bevölkerung mit Wohnorten konnte direkt aus der süd-afrikanischen Volkszählung erzeugt werden. Die jeweiligen Arbeitsorte wurden aus dem "National Household Travel Survey" zugespielt. Nur Personen mit Auto als Verkehrsmittel wurden hier berücksichtigt.

Da MATSim auf vollständigen Tagesplänen besteht, wurden daraus sogenannte home-work-home-Pläne erzeugt. In XML-artiger Syntax sehen diese aus wie folgt; Abb. 1 oben zeigt eine Visualisierung.

<plan>

<act type="home" link="30001" end\_time="06:31:00" ... />

<leg mode="car" ... >

<route ...>30001 30003 ... </route>

</leg>

<act type="work" link="413171" end\_time="15:46:00" ... />

<leg mode="car" ... >

<route ...>413171 413061 ... </route>

</leg>

<act type="home" link="30001" ... />

</plan>

- Wirtschaftsverkehr wurde basierend auf GPS-Aufzeichnungen eines Teils der Flotte synthetisch generiert (Joubert und Axhausen, 2013); Abb. 1 unten zeigt eine Visualisierung.

<sup>1</sup> www.osm.org



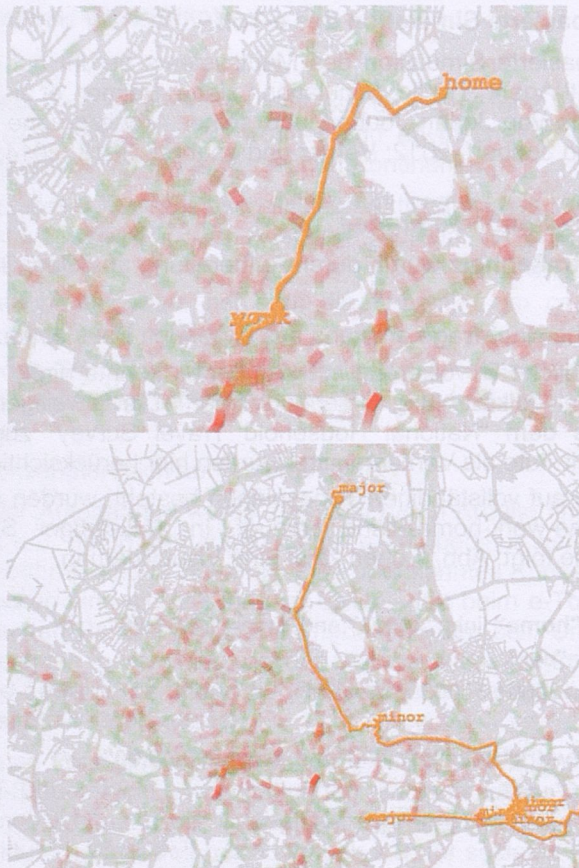


Abb. 1: Home-work-home-Plan (oben)  
Plan eines kommerziellen Fahrzeuges (unten)

### Iterationen

MATSim beruht auf einem Zyklus:

1. Alle synthetischen Reisenden  $n$  wählen einen Plan  $i$ .
2. Alle ausgewählten Pläne  $n,i$  werden simultan in einer mikroskopischen Verkehrssimulation ausgeführt.
3. Die tatsächlich erfahrenen Tagesabläufe aller synthetischen Reisenden  $n$  werden durch entsprechende Scores  $S_{n,i}$  bewertet.
4. Ein Teil der Reisenden kopiert einen seiner Pläne, verändert die Kopie, und wählt diese Kopie.

5. Alle anderen Reisenden wählen aus den vorhandenen Plänen entsprechend dem Score, typischerweise entsprechend einem Logit-Modell, also mit höherer Wahrscheinlichkeit für Pläne mit höherem Score.

6. Goto 2.

Ein Durchlauf wird Iteration genannt; ein typischer MATSim-Lauf besteht aus hunderten solcher Iterationen. Die Iterationen werden beendet, wenn das System relaxiert ist; als Indikatoren für Relaxation werden aggregierte Größen wie z.B. die Summe aller Reisezeiten verwendet.

Die untersuchte Simulation erlaubte als Anpassungsreaktion (= Veränderung der Kopie eines Planes, Schritt 4) neue Routen. Veränderung von Zeiten und Verkehrsmitteln ist mittelfristig geplant, wurde aber in der betrachteten Studie nicht berücksichtigt.

### **Score**

Da die synthetischen Reisenden mit größerer Wahrscheinlichkeit Pläne mit höherem Score wählen, muss die entsprechende Bewertungsfunktion die Präferenzen der handelnden Personen reflektieren. Da bei den hier betrachteten Simulationen nur Routenwahl betrachtet wird, genügt zunächst eine Funktion, die Reisezeit gegen Mautkosten abwägt. Die hier gewählte Funktion lautet

$$V_{n,i} = \beta_{ttrav} \cdot t_{trav} + \beta_{ctrav} \cdot c_{trav} ,$$

wobei  $t_{trav}$  und  $c_{trav}$  Zeit und monetäre Kosten aller Wege des Tages sind, und  $\beta_{ttrav}$ ,  $\beta_{ctrav}$  die marginalen Nutzen von Reisezeit und monetären Kosten angeben. Entsprechend ist

$$VTTS = \beta_{ttrav} / \beta_{ctrav}$$

der “value of travel time savings” oder Zeitwert.

### **Maut**

Bezogen auf das Einschalten der Maut kann man sich den Ablauf der Simulation wie folgt vorstellen:

- Zunächst laufen viele Iterationen ohne Maut. Währenddessen suchen alle synthetischen Reisenden einen “normalen” Plan. Entsprechend den gewählten Parametern nimmt die Simulation an, dass dabei keine monetären Kosten entstehen, und wählt dementsprechend die schnellste Route, unter der üblichen Bedingung, dass dies auch alle anderen tun, so dass sich ein Nash Gleichgewicht (genau genommen: eine Approximation eines Stochastischen Nutzer-Gleichgewichts, vgl. Nagel und Flötteröd, 2012) ergibt.
- Dann wird die Maut eingeschaltet.
- Nach dem Einschalten der Maut sind Autobahnen plötzlich teurer. Die synthetischen Reisenden probieren als Reaktion viele unterschiedliche



Routen, welche, die preiswert sind, weiterhin welche, die schnell sind, und Kompromisse (vgl. Nagel et al., 2014). Dabei beziehen sie, da die Scoring Funktion auf der Ausführung der Pläne beruht, entstehende Staueffekte mit ein.

- Schlussendlich finden sie neue Routen, die eine für die jeweilige synthetische Person günstige Balance zwischen Fahrzeit und Mautkosten darstellt.

### 2.3 Resultate

Es handelt sich nicht um eine voll kalibrierte Simulation, so dass die Resultate nur als Tendenzen verstanden werden sollten. Sie bewegen sich aber im Rahmen der Vorhersagen und Beobachtungen.

Abb. 2 zeigt Belastungsdifferenzen gegenüber dem Zustand ohne Maut. Es ist deutlich zu sehen, dass die Autobahnen entlastet werden, das sekundäre Netz hingegen mehr belastet wird.



Abb. 2: Belastungsdifferenzen gegenüber dem Zustand ohne Maut. Grün bedeutet niedrigere Belastungen (Flüsse), rot höhere. Die Autobahn, die diagonal durch Johannesburg geht (im unteren Bereich des Bildes) gehört einem anderen Betreiber und ist daher von der Maut ausgenommen.



Tab. 1 listet Gewinne und Verluste für unterschiedliche Untergruppen. Private Reisende, die nach der Einführung der Maut diese dann auch zahlen, gewinnen zwischen 75 und 90 Sekunden Zeit pro Tag, wofür sie zwischen ZAR 8 und 10 zahlen. Kommerzielle Reisende zahlen zwischen ZAR 12 und 19 und gewinnen dafür zwischen 65 und 73 Sekunden. Dabei ist es plausibel, dass die zeitlichen Gewinne trotz höherer Mautzahlungen bei den höheren Zeitwerten (siehe zweite Spalte der Tabelle) niedriger ausfallen: Zum einen gibt es hier eine Zahlungsbereitschaft bereits für geringere Zeitgewinne; zum anderen wird die Autobahn durch die stärkere Nutzung langsamer.

Reisende, die nach der Einführung keine Mautstrecke benutzen, haben im Mittel ganz erhebliche Zeitverluste. Dabei hat diejenige Untergruppe, die explizit von einer mautpflichtig gewordenen Route gewegewechselt ist ("Ausweicher"), die höchsten Zeitverluste.

Die Größenordnungen der Mauteinnahmen entsprechen sowohl den Vorhersagen (Standish et al., 2010) als auch den derzeitigen Presseberichten (Mail & Guardian, 2013; Donnelly, 2014).

Tab. 1: Mittlere Veränderungen für bestimmte Untergruppen.

„privat“ bezeichnet nicht-kommerziellen Verkehr, „kommerz.“ den kommerziellen. „Zahler“ bezeichnet Personen, die nach der Einführung der Maut an irgendeiner Stelle Maut zahlen, „Nicht-Zahler“ zahlen nicht. „Ausweicher“ sind diejenigen Nicht-Zahler, die mit ihrer vorher gewählten Route nun zahlen müssten. Grün sind Verbesserungen, rot Verschlechterungen. Die jeweils erste Zeile kommt von Simulationen mit einem Zeitwert von 20 ZAR/h (eher niedrig), die zweite von Simulationen mit einem Zeitwert von 110 ZAR/h (eher hoch). – Es gab auch schon vorher bemaute Strecken, die im Zusammenhang mit der neuen Maut ggf. vermieden werden; deshalb ist es möglich, dass die Ausweicher *weniger* zahlen als vorher.

	Basis-VoT [ZAR/h]	Reisezeit- Veränderung [s]	Zahlungs- Veränderung [ZAR]	Anzahl Betroffene
privat, Zahler	20	-90	+8	197 000
	110	-75	+10	284 000
privat, Nicht-Zahler	20	+174	0	1 378 000
	110	+20	0	1 291 000
enthält: privat, Ausweicher	20	+626	-1	187 000
	110	+117	-2	126 000
kommerz., Zahler	20	-73	+12	193 000
	110	-65	+19	262 000
kommerz., Nicht-Zahler	20	+272	0	459 000
	110	+90	0	390 000
enthält: kommerz., Ausweicher	20	+689	-3	157 000
	110	+325	-5	99 000
alle	20	+144	+1	
	110	+10	+3	



## 2.4 Konsequenzen

Im Mittel hat in den Simulationen die gesamte Bevölkerung sowohl zeitliche als auch monetäre Verluste. Die genauen Ursachen dafür könnten mit der Simulation untersucht werden; dies sind noch zu leistende zukünftige Arbeiten. Es ist zu vermuten, dass insbesondere in den Nebenverkehrszeiten trotz Rabatt viele Reisende auf dem sekundäre Netz fahren, obwohl auf den Autobahnen noch genügend Kapazität vorhanden wäre; dies ist dann klar ineffizient. Weiterhin sind, soweit es sich aus den Medien ergibt, die Kosten für die Mauterhebung hoch (ca. 30% der Einnahmen, Mail & Guardian, 2013).

Insgesamt bestehen in der Bevölkerung erhebliche Widerstände gegen die Maut, die sich u.a. darin äußern, dass ein großer Anteil der Benutzer die Maut gar nicht zahlt (Donnelly, 2014). Diese Widerstände speisen sich vermutlich aus allgemeineren Überlegungen, aber die im vorherigen Absatz erklärte geringe ökonomische Effizienz dürfte einer hohen Akzeptanz nicht zuträglich sein. Allerdings herrscht in der Bevölkerung auch ein nur geringes Verständnis für den Unterschied zwischen fiskalischer und Gebühren-Finanzierung. Immerhin wird die zu erwartende Zunahme der Nachfrage die ökonomische Effizienz des Verfahrens auf Dauer verbessern, da sie sich damit zunehmend von einer Benutzungsgebühr zu einer Staugebühr (welche die externen Kosten des Staus internalisiert) entwickeln wird (s. z.B. Lindsey und Verhoef, 2001). Dennoch wäre im Sinne der ökonomischen Effizienz über eine weitere Rabattierung in der Nebenverkehrszeit nachzudenken.

## 3 Hypothetische Internalisierung externer Kosten für den Großraum München

Sehr viel kürzer soll von Simulation zur Internalisierung von Immissionskosten berichtet werden (Kickhöfer und Nagel, 2013; Kickhöfer und Kern, 2014). Hier wurde für den Großraum München eine ähnliche Simulation wie für Gauteng aufgesetzt. Zusätzlich zur Routenwahl haben hier die synthetischen Reisenden auch Verkehrsmittelwahl als Ausweich-Dimension zur Verfügung. Die hypothetische Maut errechnet sich aus den Immissionswirkungen eines jeden Fahrzeugs; dafür werden die Aufenthalte der synthetischen Personen an den Kanten im Modell nachverfolgt, wie dies nur eine vollständige aktivitäten-orientierte Simulation kann. Für weitere Details, siehe (Kickhöfer und Nagel, 2013; Kickhöfer und Kern, 2014).

Abb. 3 zeigt Resultate, differenziert nach den Untergruppen "urban" (Wohnort und Arbeitsplatz innerhalb der Stadtgrenzen), Einpendler ("commuter", Wohnort außerhalb und Arbeitsplatz innerhalb der Stadtgrenzen), Auspendler ("reverse commuter", Wohnort innerhalb und Arbeitsplatz außerhalb der Stadtgrenzen) sowie Frachtverkehr.



Auffällig ist zunächst, dass sich bzgl. externer Kosten der Emission praktisch gar kein Nutzen ergibt – die Emissionen verringern sich praktisch gar nicht. Hingegen verbessert sich der Verkehrsfluss (“congestion”), sozusagen als Kollateralnutzen der Immissions-Maut. Auch die Schadenswirkungen (“exposure”) verbessern sich – im Vergleich mit den Emissionen sollte man sich vergegenwärtigen, dass lokale Schadenswirkungen ggf. durch längere Wege reduziert werden können. Die von den Nutzern direkt wahrnehmbaren Wirkungen (Verkehrsfluss minus Mautzahlung; “user direct”) sind für die urbanen Nutzer positiv, für alle anderen negativ. Bezieht man die Schadenswirkungen der Immissionen ein (“user-inc-exp”), sieht es besser aus, aber es ist unklar, ob reale Personen eine den Schadenswirkungen äquivalente Zahlungsbereitschaft haben. Ein großer Gewinner ist die Regierung, durch die Mauteinnahmen. Unterm Strich hat die Maßnahme erhebliche positive Wirkungen, wobei “all-w-exp” annimmt, dass jeweilige Einnahmen innerhalb der Nutzergruppe verbleiben – in der Praxis dürften sich hier andere Verteilungswirkungen ergeben.

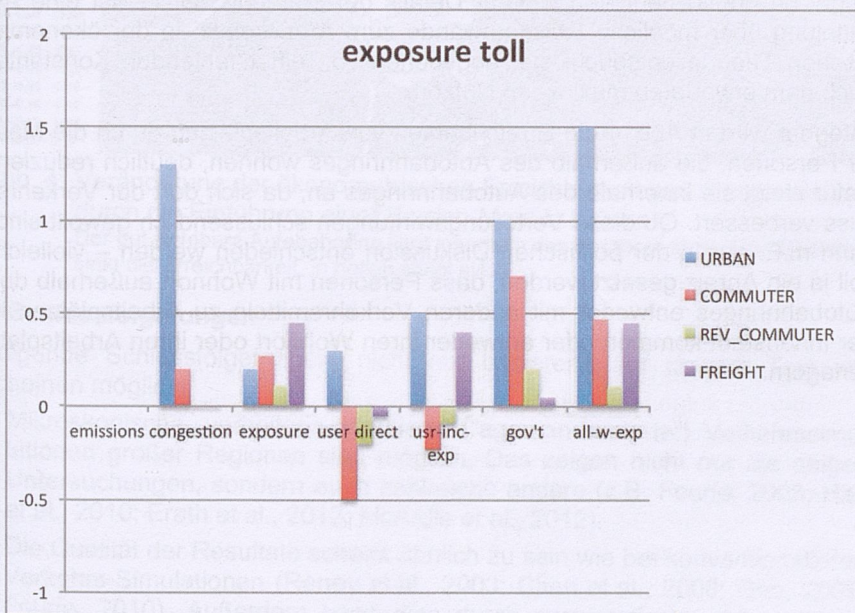


Abb. 3: Rechnerische Nutzen (in Millionen Euro pro Tag) einer hypothetischen Internalisierung von Emissionskosten durch eine entsprechende fahrzeug- und tageszeit-spezifische Maut. Die Kategorien werden im Text erklärt.



#### 4 Eine hypothetische Cordon-Maut am Autobahn-Ring in Brüssel

Schlussendlich ein kurzer Bericht von Simulationen einer Kordon-Maut für Brüssel (Röder et al., 2013). Die Simulation ergab sich aus einer mit UrbanSim (Waddell et al., 2003) durchgeführten Studie im Rahmen des SustainCity Projektes (SustainCity www pages, accessed June 2013) für den Raum Brüssel (Cabrita et al., forthcoming).

Abb. 4 zeigt die Veränderung der Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen durch eine hypothetische Kordon-Maut am Autobahn-Ring, wobei der Ring selber *innerhalb* des Kordons liegt. Als Maß für Erreichbarkeit wird der ökonometrische Logsum-Ausdruck verwendet:

$$A_i = \ln \sum_j e^{V_{ij}} \quad (1)$$

wobei  $i$  den Ausgangsort bezeichnet,  $j$  über alle potentielle Arbeitsplätze läuft, und  $V_{ij}$  bezeichnet den Reiseaufwand (meistens negativ) von  $i$  nach  $j$ .<sup>2</sup> Eine eventuell zu leistende Mautzahlung ist Teil dieses Aufwandes. Nicolai und Nagel (in press) berichten weitere Details der Methodik; Gl. (1) ist eine Art Mittelung über mögliche Reiseaufwände zum Arbeitsplatz; in der ökonometrischen Theorie entspricht sie, abgesehen von einer fehlenden Konstante, auch dem erwarteten maximalen Nutzen.

Offenbar wird in Abb. 4 die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen durch die Maut für Personen, die außerhalb des Autobahnringes wohnen, deutlich reduziert. Dafür steigt sie innerhalb des Autobahnringes an, da sich dort der Verkehrsfluss verbessert. Ob diese Verteilungswirkungen schlussendlich gewollt sind, kann m.E. nur in der politischen Diskussion entschieden werden – vielleicht soll ja ein Anreiz gesetzt werden, dass Personen mit Wohnort außerhalb des Autobahnringes entweder mit anderen Verkehrsmitteln zu Arbeitsplätzen in der Innenstadt kommen oder entweder ihren Wohnort oder ihren Arbeitsplatz verlagern.

<sup>2</sup> Hierbei wird ein eventuell vorhandener sogenannter "scale parameter" in  $V_{ij}$  integriert.





Abb. 4: Veränderung der ökonomischen Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen durch die Einführung einer Kordon-Maut in Brüssel.  
Der gut sichtbare Autobahnring liegt innerhalb des Kordons. In dunklen Gebieten sinkt die Erreichbarkeit, in hellen steigt sie.

## 5 Schlussfolgerungen

Folgende Schlussfolgerungen, nicht nur basierend auf obigem Text, erscheinen möglich:

- Mikroskopische, verhaltens-orientierte ("agenten-basierte") Verkehrssimulationen großer Regionen sind möglich. Das zeigen nicht nur die obigen Untersuchungen, sondern auch zahlreiche andere (z.B. Fourie, 2008; Hao et al., 2010; Erath et al., 2012; McArdle et al., 2012).
- Die Qualität der Resultate scheint ähnlich zu sein wie bei konventionelleren Verkehrs-Simulationen (Raney et al., 2003; Chen et al., 2008; Gao, 2009; Fourie, 2010). Außerdem kann dies durch systematische automatische Kalibrierung verbessert werden (Flötteröd et al., 2012; Moyo Oliveros und Nagel, 2013; Ziemke et al., 2015). Dabei ist die Expressivität des agenten-basierten Ansatzes durch die Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik, ganzer Tagespläne, sowie der simultanen Berücksichtigung von Routen, Zeiten und Verkehrsmitteln zweifelsohne größer.



- Somit sind auch Maut-Simulationen möglich, die alle diese Aspekte berücksichtigen. Weiterhin erlaubt die disaggregierte Simulationsmethodik beliebige Aggregationen noch nach Abschluss der Simulationen.
- Die im Bericht angesprochenen Resultate zeigen, dass Mautsysteme deutlich bis dramatisch effizienter werden können, wenn man ihnen ein Steuerungsziel gibt. Mögliche Steuerungsziele sind Staureduktion, Emissionsreduktion oder Immissionsreduktion. Mautsysteme, die z.B. aus finanzpolitischen Überlegungen eingeführt werden, liefern zwar oft die gewünschten Einnahmen, ignorieren aber gleichzeitig mögliche Effizienzgewinne, z.B. durch systematische Staureduktion oder Reduktion von Emissionen/Immissionen.
- Eine emissions- oder immissionsreduzierende Maut kann erheblichen "Kollateralnutzen" für die Staureduktion haben; eine Kordon-Maut kann erhebliche räumliche Verteilungswirkungen haben.

## Literatur

- Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel, and K. Axhausen. MATSim-T: Architecture and simulation times. In A. Bazzan and F. Klügl, eds., *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation*, pp. 57–78. IGI Global, 2009.
- Cabrita, I., S. Gayda, R. Hurtubia, D. Efthymiou, I. Thomas, D. Peeters, J. Jones, C. Cotteels, K. Nagel, T. Nicolai, and D. Röder. *Integrated land use and transport microsimulation for Brussels*, chap. 19. EPFL Press, forthcoming.
- Chen, Y., M. Rieser, D. Grether, and K. Nagel. Improving a large-scale agent-based simulation scenario. VSP Working Paper 08-15, TU Berlin, Transport Systems Planning and Transport Telematics, 2008.  
See <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Donnelly, L. Gauteng and national transport at odds over e-tolling review. *Mail & Guardian*, 2014.
- du Plessis, W. and J. W. Joubert. Evaluating the effect of road pricing strategies in MATSim, using agent-specific and income-dependent values. In *Computers and Industrial Engineering*, vol. 42, pp. 1–8. Cape Town, South Africa, 2012.
- Erath, A., P. Fourie, M. van Eggermond, S. Ordóñez Medina, A. Chakirov, and K. W. Axhausen. Large-scale agent-based transport travel demand model for Singapore. In *Proceedings of The 13th Conference of the International Association for Travel Behaviour Research (IATBR)*. Toronto, Canada, 2012.
- Flötteröd, G., Y. Chen, and K. Nagel. Behavioral calibration and analysis of a large-scale travel microsimulation. 2012. 10.1007/s11067-011-9164-9.
- Fourie, P. Agent-based transport simulation versus equilibrium assignment for private vehicle traffic in Gauteng. Tech. rep., Planning Support Systems, CSIR Built Environment, P O Box 395, Pretoria 0001, 2010.
- Fourie, P. J. Multi-agent transport simulation of South African commuters. 2008.
- Gao, W. *Comparisons between MATSim and EMME/2 on the Greater Toronto and Hamilton Area Network*. Master thesis, University of Toronto, 2009.
- Hao, J. Y., M. Hatzopoulou, and E. J. Miller. Integrating an activity-based travel demand model with dynamic traffic assignment and emission models – implementation in the



- Greater Toronto, Canada, Area. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2176, 1, 2010. 10.3141/2176-01.
- Joubert, J. W. and K. W. Axhausen. A complex network approach to understand commercial vehicle movement. *Transportation*, 3, 729, 2013. 10.1007/s11116-012-9439-0.
- Kickhöfer, B. and J. Kern. Pricing local emission exposure of road traffic: An agent-based approach. In *Proceedings of the International Scientific Conference on Mobility and Transport (mobil.TUM)*. 2014. Also VSP WP 14-09, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Kickhöfer, B. and K. Nagel. Towards high-resolution first-best air pollution tolls. *Networks and Spatial Economics*, pp. 1–24, 2013. 10.1007/s11067-013-9204-8.
- Lindsey, R. and E. T. Verhoef. Traffic Congestion and Congestion Pricing. In: Hensher, D. and K. Button, eds., *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*, 2001, 3, 77-105
- Mail & Guardian. E-toll revenue will not go overseas, says Sanral. 2013.
- McArdle, G., E. Furey, A. Lawlor, and A. Pozdnoukhov. Using digital footprints for a city-scale traffic simulation. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2012.
- Moyo Oliveros, M. and K. Nagel. Automatic calibration of agent-based public transit assignment path choice to count data. In *Conference on Agent-Based Modeling in Transportation Planning and Operations*. Blacksburg, Virginia, USA, 2013. Also VSP WP 13-13, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Nagel, K. and G. Flötteröd. Agent-based traffic assignment: Going from trips to behavioural travelers. In R. Pendyala and C. Bhat, eds., *Travel Behaviour Research in an Evolving World – Selected papers from the 12th international conference on travel behaviour research*, chap. 12, pp. 261–294. International Association for Travel Behaviour Research, 2012. ISBN 978-1-105-47378-4.
- Nagel, K., B. Kickhöfer, and J. W. Joubert. Heterogeneous tolls and values of time in multi-agent transport simulation. *Procedia Computer Science*, 32, 762, 2014. 10.1016/j.procs.2014.05.488.
- Nicolai, T. W. and K. Nagel. High resolution accessibility computations. In A. Condeço, A. Reggiani, and J. Gutiérrez, eds., *Accessibility and spatial interaction*. Edward Elgar, in press. Also VSP WP 13-02, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Raney, B., N. Cetin, A. Völlmy, M. Vrtic, K. Axhausen, and K. Nagel. An agent-based microsimulation model of Swiss travel: First results. *Networks and Spatial Economics*, 3(1), 23, 2003.
- Röder, D., I. Cabrita, and K. Nagel. Simulation-based sketch planning, part III: Calibration of a MATSim-model for the greater Brussels area and investigation of a cordon pricing for the highway ring. VSP working paper 13-16, TU Berlin, Berlin, Germany, 2013. See <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Standish, B., A. Boting, and A. Marasy. An economic analysis of the Gauteng freeway improvement scheme. Tech. rep., Prepared for Provincial Government of Gauteng and South African National Roads Agency (Pty) Ltd, 2010. University of Cape Town, Strategic Economic Solutions, Arup Consulting.
- SustainCity [www pages](http://www.sustaincity.org/). SustainCity. <http://www.sustaincity.org/>, accessed June 2013.
- Venter, C. and J. W. Joubert. Using multi-source GPS data to characterize multiday driving patterns and fuel use in a large city region. Annual Meeting Preprint 13-1033, Transportation Research Board, Washington D.C., 2013.



- Venter, C. J. and J. W. Joubert. Tax or toll? GPS-based assessment of equity impacts of large scale electronic freeway tolling in Gauteng, South Africa. Tech. Rep. 14-0702, 2014.
- Waddell, P., A. Borning, M. Noth, N. Freier, M. Becke, and G. Ulfarsson. Microsimulation of urban development and location choices: Design and implementation of UrbanSim. *Networks and Spatial Economics*, 3(1), 43, 2003.
- Ziemke, D., K. Nagel, and C. Bhat. Integrating CEMDAP and MATSim to increase the transferability of transport demand models. Annual Meeting Preprint 15-5516, Transportation Research Board, Washington D.C., 2015. Also VSP WP 14-15, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.